

高压陶瓷变压器*

朱凤珠 许煜寰

(山东科学技术大学物理系)

提 要

本文介绍了压电陶瓷变压器的工作原理和试制样品各种性能的测试结果。试制的陶瓷变压器在半波谐振模式、输出端开路时,交流输出的升压比为450;当负载电阻 > 20 兆欧时,交流输出升压比不低于320。在半波谐振模式、四倍压整流、负载阻抗匹配的工作状态下,变压器最大输出功率为19瓦,升压比可达到620,最大效率在88%以上。在使用上作了一些试验,效果良好。

一、引 言

压电陶瓷变压器的研制在五十年代初就已经开始,当时是用钛酸钡($BaTiO_3$)作为材料,升压比很低^[1],在实用上没有引起人们的注意。其后由于新的铁电材料如锆钛酸铅(PZT)等的出现,以及材料性能的改进,获得了高机电耦合系数和高 Q_M 值的压电陶瓷材料。国外近年来对陶瓷变压器的材料和应用进行了不少研究,得到了较好的效果;目前据称已制成升压比约为300,输出功率约为40—50瓦的陶瓷变压器^[2]。

本文着重介绍我们试制的长度谐振模(横向型)压电陶瓷变压器的工作原理、主要性能、应用上的试验及对今后工作的一些设想。

二、陶瓷变压器的工作原理和用途

压电陶瓷变压器的结构如图1所示。图中左半部分上下面都有烧渗的银电极,沿厚度方向极化,作为输入端,称为驱动部分;右半部分的右端也有烧渗的银电极,沿长度方向极化,作为输出端,称为发电部分。

当把一定频率的交变电压加到输入端,整个压电陶瓷片就产生长度方向的电致伸缩(逆压电效应),由电致伸缩引起的机械谐振又使得发电部分两端出现符号相反的束缚电荷(正压电效应)。因为谐振的结果,发电部分产生振幅相当大的应变,因而束缚电荷的电量是相当可观的。由于束

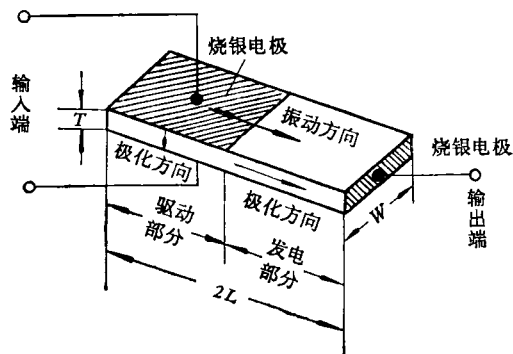


图1 陶瓷变压器的结构

* 1972年8月10日收到。

缚电荷对空间电荷的吸引, 在输出端可得到相当高的正弦形电压. 图 2 为试制的变压器的照片, 一般输入几伏到几十伏的电压, 在输出端可获得几千伏以上的高压.

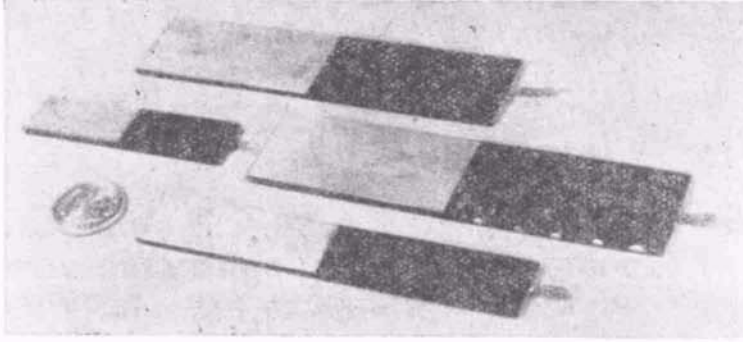


图 2 陶瓷变压器实物照片

变压器的工作频率取决于压电陶瓷材料中的声速 c , 和片的全长 $2L$, 例如半波谐振时, 中心频率

$$f_0 = \frac{c}{4L}. \quad (1)$$

由变压器的机电等效电路推算, 可以得出变压器的空载升压比为^[3]

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)_\infty \simeq \frac{4}{\pi^2} Q_M k_{31} k_{33} \frac{L}{T}, \quad (2)$$

式中 $\left(\frac{V_2}{V_1}\right)_\infty$ 为空载时输出电压与输入电压之比, Q_M 为机械品质因素, k_{31} 、 k_{33} 为机电耦合系数, T 为变压器厚度, $2L$ 为变压器的全长.

工作方式可采用半波谐振 ($\lambda/2$) 模式, 或全波谐振 (λ) 模式, 如图 3 所示.

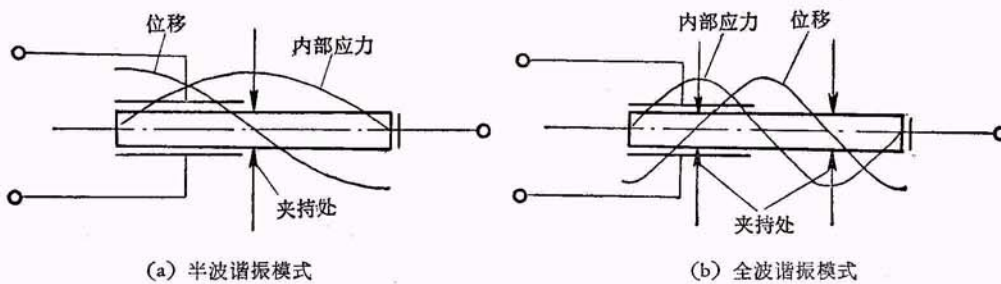


图 3 陶瓷变压器的谐振模式

压电陶瓷变压器主要应用于高电压弱电流场合, 例如用作电视显象管、雷达显象管、阴极射线示波管等所需的高压电源. 变压器尺寸大小应根据不同整机所要求的工作频率、升压比和功率而定.

与铁芯线圈变压器相比, 陶瓷变压器体积小、重量轻. 其突出优点是在使用时不会击穿与燃烧, 不出现干扰磁场, 结构简单, 制作工艺简便, 大批生产成本低廉. 其缺点是只能在谐振频率下工作, 因而尺寸和稳定性都受一定限制.

三、性能测试

我们试制了各种配方的压电陶瓷变压器,并作了系统的测量,现以配方 PMN-98 压电陶瓷变压器为例作介绍。PMN-98 压电陶瓷材料的物理性能见表 1,图 4 是陶瓷晶粒的电子显微镜照片($\times 3000$)。变压器的尺寸为 120 毫米 \times 30 毫米 \times 2 毫米。

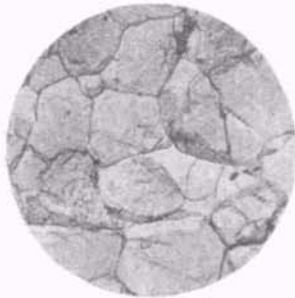


图 4 PMN-98 压电陶瓷的显微照片($\times 3000$)

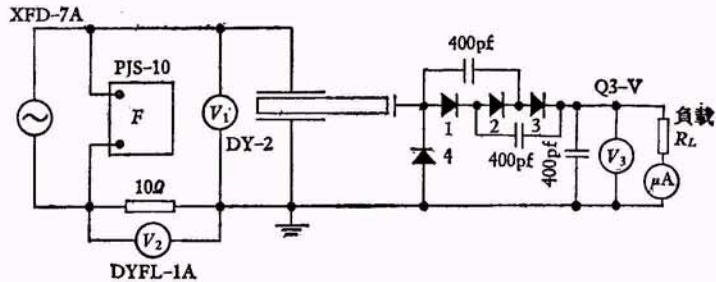


图 5 陶瓷变压器测试电路

图中 1、2、3 为 $2 \times 2DL-1$; 4 为 $4 \times 2DL-1$

(照片是中国科学院硅酸盐化学与工学研究所帮助拍摄的)

表 1 PMN-98 配方压电陶瓷材料的性能参数

机-电耦合系数				一年后 k_p 变化	介电常数				介质损耗 $\text{tg } \delta$	机械品质因数 Q_M	频率温度系数 T_{kf}	居里温度 $T_c(^\circ\text{C})$	
k_p	k_{31}	k_{33}	k_{15}		$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$					
0.60	0.37	0.79	0.66	$< -0.5\%$	1700	1250	1790	1180	0.007	1100	$-40 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	300 ± 10	
压电应变常数 $\times 10^{-12}$ 库仑/牛顿			压电“电压”常数 $\times 10^{-3}$ 米 ² /库仑			弹性柔顺系数 $\times 10^{-12}$ 米 ² /牛顿					密度 ρ $\times 10^3$ 公斤/米 ³	泊松比 σ	
d_{33}	d_{31}	d_{15}	g_{33}	g_{31}	g_{15}	S_{11}^E	S_{11}^P	S_{33}^E	S_{33}^P	S_{55}^E			S_{55}^P
460	-156.5	518	30.57	10.40	32.70	11.90	10.27	22.80	8.47	39.1	22.1	7.88	0.26

参数测量按 IRE 1961 年标准^[7]进行, d_{33} 为静态法测量的结果。

1. 测试线路

测试线路如图 5 所示,变压器输出端为 4 倍压整流电路(也可以不用整流)。以 XFD-7A 型低频讯号发生器作讯号源, V_1 为 DY-2 型有效值电压表, V_2 为 DYFL-1A 型电子管多用表, V_3 为 Q3-V 型静电高压表, 10Ω 为标准电阻,频率用 PJS-10 型电子计数式频率计测量。

2. 测试结果

(1) 交流升压比-负载特性 在不使用整流线路时,直接测量变压器的交流输出电压,得出交流升压比为 $V_{\text{交流输出}}/V_{\text{交流输入}}$ 。 $\lambda/2$ 振模,输入 10 伏电压有效值,在输出端开路时,测得交流升压比为 450;在输出端有负载的情况下,若负载 > 20 兆欧时,升压比在 320

以上,而当负载 < 15 兆欧时,升压比随负载的减小而很快下降,如图 6 所示。

(2) 升压比-频率特性 经 4 倍电压整流(如图 5 线路)后,变压器的升压比为 $V_{\text{输出(DC)}}/V_{\text{输入(有效值)}}$ 。当输入电压 $V_{\lambda}=20$ 伏,负载 $R_L=100$ 兆欧时,测得的升压比对频率变化的曲线如图 7 所示,在 4 倍压整流、半波谐振时,最高升压比为 620,相应于谐振频率 f_0 在 13.65 千周处。

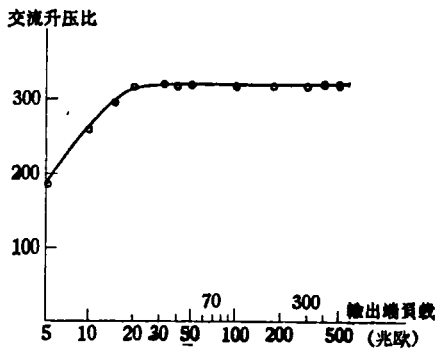


图 6 交流升压比-负载特性

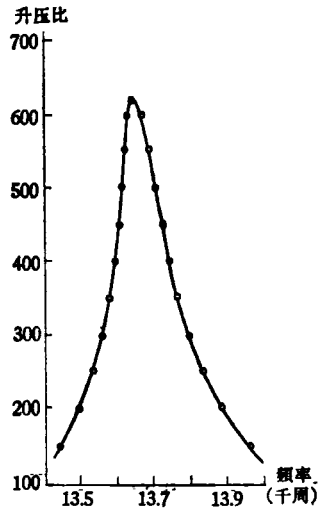


图 7 升压比-频率特性

(3) 输出-输入电压特性 当 $\lambda/2$ 振模, $R_L = 100$ 兆欧, 4 倍压整流时,测量结果如图 8 所示,输出-输入电压关系接近直线,线的后部斜率稍有下降,但在测量范围内并没有达到饱和。由于静电高压表量程的限制,没有继续测量下去。

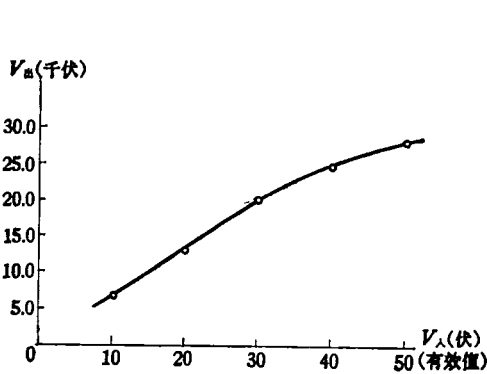


图 8 输出-输入电压特性

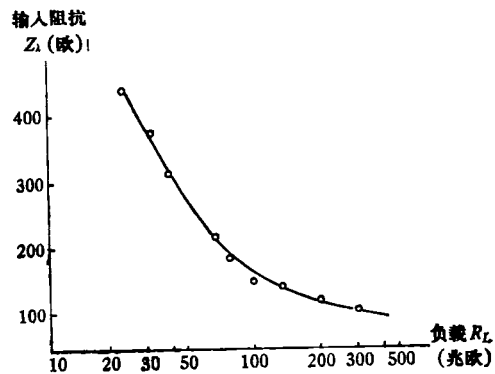


图 9 输入阻抗-负载阻抗特性

(4) 输入阻抗-负载阻抗特性 陶瓷变压器与一般线绕变压器输入阻抗特性不同,随着负载阻抗的增加,陶瓷变压器输入阻抗减小。图 9 表示当 $\lambda/2$ 振模, $V_{\lambda} = 20$ 伏(有效值), 4 倍压整流时实际测量的输入阻抗随负载变化的情况。

(5) 效率-负载阻抗特性 变压器效率 $\eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}}$ 。输入电压 $V_{\lambda} = 20$ 伏,在半波谐振状态下,分别对 4 倍压整流和 2 倍压整流测量了效率-负载特性,结果如图 10 所示。从图中可以看出,在 4 倍压整流时,当负载 $R_L = 40$ 兆欧时,效率最高达 88% (实际效率还要高一些,因为在计算时忽略了输入电压与输入电流的位相差),以后效率随 R_L 的

增加而降低。而2倍压整流在 $R_L = 15$ 兆欧时效率最高,以后随着负载的增加,效率急剧下降。在同样负载下,2倍压整流效率比4倍压整流要低得多,我们认为这是2倍压整流电路阻抗与变压器输出阻抗不匹配所致。

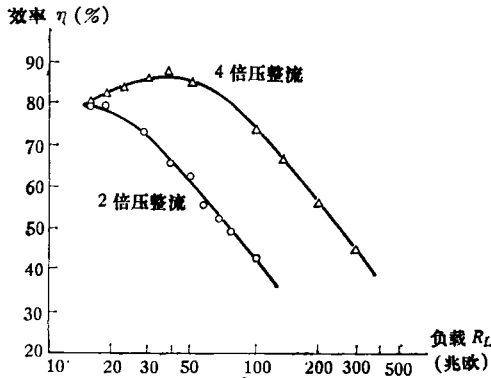


图10 效率-负载阻抗特性

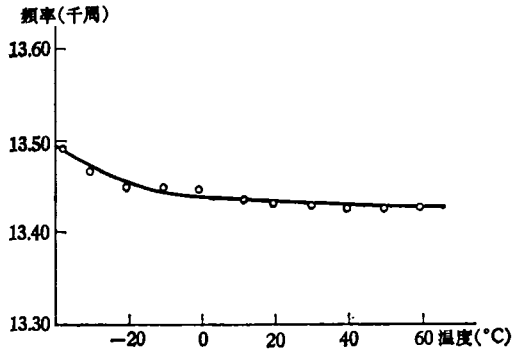


图11 谐振频率-环境温度特性

(6) 谐振频率-环境温度特性 图11表示在环境温度由 -40°C 变化到 $+60^{\circ}\text{C}$ 时,当 $\lambda/2$ 振模, $V_{\lambda} = 20$ 伏, $R_L = 100$ 兆欧,四倍压整流下,测得谐振频率变化的情况,在 -20°C 以上,频率变化是相当小的。变压器本身的发热和驱动电压的大小直接有关,驱动电压高,发热大,会影响谐振频率略有漂移。对于半波谐振,变压器中部即波节部分内应力最大,温度最高,而两端发热较小。在整个环境温度变化过程中,输出电压的波动很小。

(7) 输出功率-负载阻抗特性 采用4倍压整流、 $\lambda/2$ 振模,当输入电压 $V_{\lambda} = 125$ 伏(有效值),且输出电压达到饱和时,测量不同负载下的最大功率,结果如图12所示。输出功率随负载电阻变化,在 $R_L = 9$ 兆欧处出现一极大值。在最大功率(19瓦)点上连续长时间工作,输出功率只略微降低,下降的值不到1瓦。

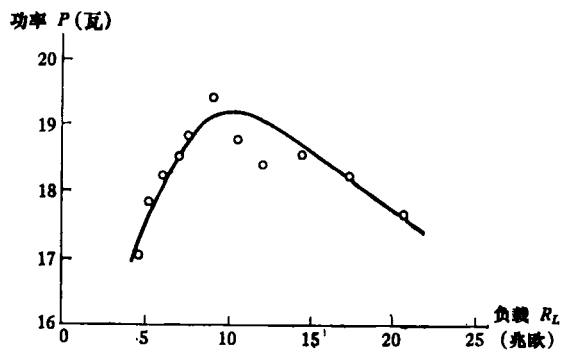


图12 输出功率-负载阻抗特性

四、 讨 论

1. 4倍压与2倍压整流测量结果比较

陶瓷变压器的整流需要用2倍、4倍、6倍等偶数倍整流电路。图7到图12的曲线是4倍压整流后测量得的结果。我们对不同材料的陶瓷变压器也用2倍压整流线路作了系统的测量。2倍压整流线路如图13所示。

从实验结果看来,2倍压整流的升压比高,如果阻抗匹配合适,在同样的驱动电压下,

2 倍压整流的输出功率并不低于 4 倍压整流的输出功率。但由于 2 倍压整流有如下缺点：

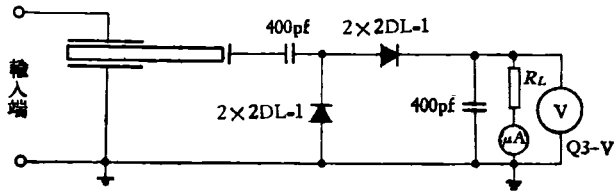


图 13 2 倍压整流线路图

点：谐振频率特性的半宽度只有 4 倍压整流的 2/3；负载增加时效率下降很快（图 10）；输入电压 ≥ 25 伏时，输出电压就已经饱和了，等等；故通常采用 4 倍压或更高倍压整流。

2. 全波谐振与半波谐振的比较

我们在 4 倍压整流情况下，对 λ 振模和 $\lambda/2$ 振模的工作情况作了比较。如图 14 所示，在 $V_{\lambda} = 20$ 伏（有效值），4 倍压整流，负载 $R_L = 100$ 兆欧时，全波谐振的最大升压比是 700，半波谐振的最大升压比是 620。从升压比-频率特性来看，全波谐振特性的半宽度为 400 周，而在半波谐振特性的半宽度仅是 230 周。看来采用全波谐振模是有一定优越性的。

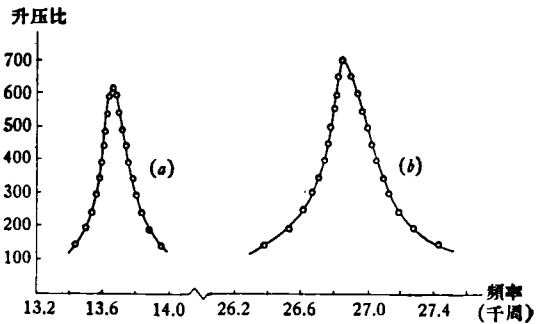


图 14 全波谐振与半波谐振的升压比-频率特性比较
(a) $\lambda/2$ 振模；(b) λ 振模

3. 变压器尺寸对输出的影响

由公式(2)可以看出，对同一材料的变压器，其升压比与变压器的长度 $2L$ 成正比，与变压器的厚度 T 成反比。变压器的宽度 W 若变窄，会使升压比稍稍降低。

宽度 W 对输出功率影响较大，片子愈宽，输出功率愈大。我们作了如下试验：使输入电压 $V_{\lambda} = 20$ 伏，用 $\lambda/2$ 振模，2 倍压整流的条件，把一个变压器的宽度由 30 毫米逐渐磨窄到 18 毫米来作多次测量，其输出功率在阻抗匹配时，由 2.3 瓦降至 1.25 瓦，如图 15 所示。

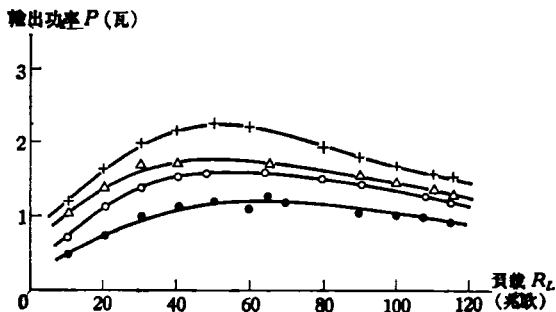


图 15 各种宽度的变压器输出功率-负载特性
+ — $W = 30$ 毫米； \triangle — $W = 27$ 毫米；
 \circ — $W = 24$ 毫米； \bullet — $W = 18$ 毫米

变压器的厚度 T 除了直接影响升压比之外，对输出功率影响也较大。若输入电压 $V_{\lambda} = 20$ 伏（有效值）， $\lambda/2$ 振模，采用 2 倍压整流，在阻抗匹配时测得输出功率随变压器厚度 T 的变化列于表 2。

表 2

厚度 T	输出功率
2.1 毫米	2.5 瓦
4.3 毫米	1.6 瓦
8.8 毫米	0.9 瓦

4. 变压器的极化

变压器的极化是工艺中的关键之一。我们制作的变压器要求驱动部分沿厚度方向极化,发电部分沿长度方向极化,变压器全长约120毫米,需要极化的长度为60毫米;若按通常压电陶瓷的极化条件,即极化电场为3000伏/毫米,则需18万伏高压,这对一般极化设备来讲是很难达到的。为了得到性能良好的变压器,我们试验了高温极化工艺,把样品加热到居里温度以上开始极化,并采用带电缓慢降温的方法。实验证明,用这种方法极化,只需用原来极化电场强度的十分之一左右,就可以达到原来低温(120℃左右)高电场下的极化效果。

五、应用

陶瓷变压器在使用时,安装较简便。若采用半波谐振模,可用一个夹子(内衬以橡皮条)紧紧夹在全长1/2(节点)处;若用全波谐振模,则用一个夹子夹在驱动部分长度的一半,即全长的1/4处。图16的照片表示变压器半波谐振的安装方式。输出端用磷铜丝绕成弹簧状,用普通焊锡直接焊在被银层上,即使在大功率工作时,也没有发生过银层或引线脱落的现象。

我们对变压器的应用作了一些初步试验:

(1) 用作电子仪器中高压电源部分
 例如在变压器的驱动端输入十几伏(有效值)的电压,在输出端经4倍压整流后得到12千伏的高压,加到黑白电视接收机显象管的阳极上,可以使显象管良好地持续工作(试验持续10小时以上),电视图象清晰。又如应用陶瓷变压器供给高压,代替夜视

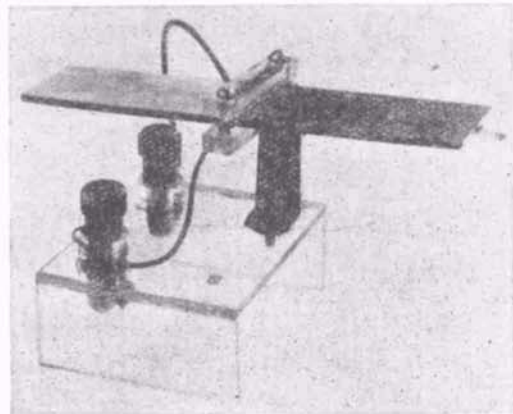


图16 变压器半波谐振的安装

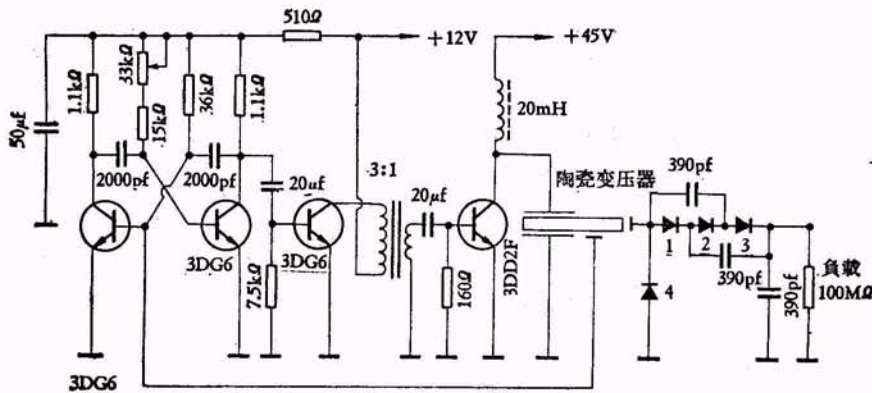


图17 “高压盒”线路图

图中1、2、3为2×2DL-1; 4为4×2DL-1

用红外变象管原来的 12 千伏高压电源,效果很好。用在雷达显示上,也得到很好的效果。陶瓷变压器做的高压电源体积小,重量轻,且不需作电磁屏蔽,对某些使用高压电源的设备小型轻量化方面是有意义的。

(2) 用作直流高压装置 我们曾将陶瓷变压器代替目前生产上通用的极化压电陶瓷的高压设备,用来极化压电陶瓷材料,得到良好的极化效果。其它需用静电高压的场合(如静电吸尘等),也可以考虑使用。

(3) “高压盒” 我们试制了一套由直流干电池供电的“高压盒”。为了得到稳定的高压输出,采用通过陶瓷变压器振荡系统构成的自激振荡电路来激励陶瓷变压器。具体线路如图 17 所示,经测试表明,当输出电压为 7.4、8.4、12.0 千伏时,整个高压盒线路效率分别达到 63%、61%、50%。图 18 是试制的高压盒实物。

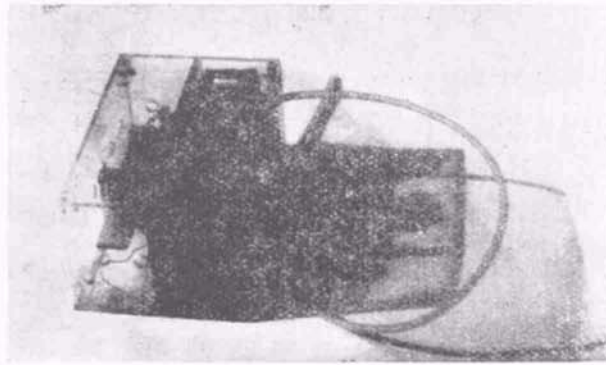


图 18 高压盒实物照片

六、结 束 语

通过对陶瓷变压器的试制和初步试用,我们认为陶瓷变压器是有前途的器件。

作为今后进一步的研究,可以从改变变压器的尺寸及电极形式,采用不同振模等,来提高输出电流和功率,降低或提高工作频率,展宽工作频带等^[4,6]。也可以进一步试验有多个输出端的“抽头变压器”^[5],从我们初步试验的结果看来,抽头输出的功率也是比较低的,只能供弱电流条件下使用。

选试更好的压电材料制作变压器,更进一步提高升压比、功率、频率稳定性,以及改善电压调整特性等,仍然是今后有意义的研究课题。

参加这项研制工作的还有魏保堂、张繁平、李婕、宋成金等同志。

参 考 文 献

- [1] H. W. Katz (Ed.), Solid state magnetic and dielectric devices, ch. 5, New York, 1959.
- [2] 川田雄彦,電子展望(日),7卷,5(1970),67.
- [3] 川田雄彦,電子材料(日),9卷,4(1970),219.
- [4] 小玉祐二郎,エレクトロニク・セラミックス,2,1971年7月号,73;1971年9月号,65.
- [5] 土屋英俊,エレクトロニク・セラミックス,2,1971年3月号,65.
- [6] Известия вузов СССР-радиоэлектроника, том XIII, (1970), 5.
- [7] IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of piezoelectric ceramics 1961, Proc. IRE, Vol. 49, (1961) 1161.